

УДК 539.4

А. Богданович¹, докт. техн. наук;
А. Козик², В. Вороб'єв², канд. техн. наук

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Республика Беларусь

²Республиканское унитарное предприятие транспорта нефти «ГомельтранснефтьДружба», г. Гомель, Республика Беларусь

ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ТРУБ НАФТОПРОВОДУ З НЕБЕЗПЕЧНИМИ ДЕФЕКТАМИ ТИПУ ТРІЩИН У ЗВ'ЯЗКУ З ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ

Резюме. Випробування на циклічну тріщиностійкість зразків з труб лінійної частини нафтопроводу здійснювали на універсальній сервогідролічеській машині в таких умовах: кімнатна температура, частота 20 Гц і коефіцієнт асиметрії $R = 0,1$. Тріщина в зразках була орієнтована в осьовому й окружному напрямках для вивчення анізотропії властивостей. Кінетичну діаграму втомного руйнування і діаграму циклічного пружно-пластичного руйнування будували за результатами випробувань та вимірювання утяжки зразка. У статті наведено значення силових і деформаційних характеристик циклічної тріщиностійкості дослідженої сталі після тривалої експлуатації.

Ключові слова: циклічна тріщиностійкість, нафтопровід, втомна тріщина, утяжка, коефіцієнт інтенсивності напружень.

A. Bogdanovich, A. Kozik, V. Vorob'ev

PERFORMANCE OF THE OIL PIPELINE WITH THE DANGEROUS DEFECTS OF CRACKS TYPE IN CONNECTION WITH THE LONG- TIME OPERATION

The summary. The fatigue crack growth resistance tests of specimens made of the tube of line parts of an oil pipeline conducted on universal servo hydraulic testing machine under next conditions: room temperature, frequency of 20 Hz and stress ratio $R = 0,1$. Specimen's crack is oriented in axial and circumferential directions for study of anisotropy properties. Fatigue crack growth diagram and the cyclic elasto-plastic fracture diagram are plotted by tests results and due to measuring of contraction. The values of force and deformation characteristics of a fatigue crack growth of investigated steel after long operation are given in paper.

Key words: fatigue crack growth resistance, oil pipeline, fatigue crack, contraction, stress intensity factor.

В процесі довготривалої експлуатації труб в результаті фізико-хімічного впливу перекачуваного продукту і зовнішнього середовища відбувається зміна структурного стану металу, деградація його фізико-механічних властивостей. Наприклад, встановлено [1], що багаторічна експлуатація призводить до розриву металу внутрішньої поверхності труби: схильність до формування тріщин суттєво зростає. С іншої ж сторони, корозійно-ерозійне вплив нафтопродуктів призводить до видалення пошкодженої тріщинами поверхневого шару

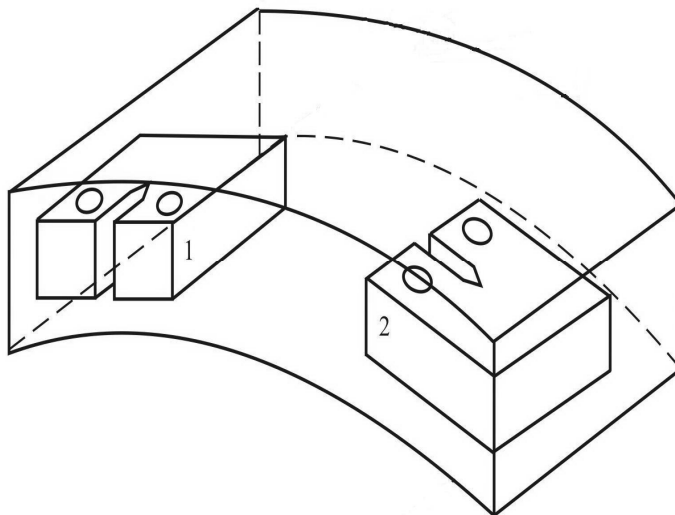
внутренней стенки трубы (проявляется своего рода эффект упрочнения). Поэтому актуальна задача экспериментального определения работоспособности труб нефтепровода, особенно при наличии опасных трещиноподобных дефектов, после продолжительного периода эксплуатации. Ниже приведены некоторые результаты экспериментальных исследований циклической трещиностойкости труб линейного участка нефтепровода после 34 лет эксплуатации.

Испытания проводили на универсальной сервогидравлической машине Vi-01-102 (Индия).

Образцы для испытаний вырезали из линейного участка трубы нефтепровода «Дружба» с ориентацией надреза и усталостной трещины в осевом и окружном направлениях трубы, согласно схеме, приведенной на рис. 1.

Компактные образцы типа 1 и 2 испытывали при внецентренном растяжении по схеме (рис. 2 а). После испытаний измеряли поперечную утяжку φ опасного сечения образца (рис. 2 б).

Компактный образец с зафиксированным датчиком раскрытия вершины трещины устанавливали в захватах испытательной машины Vi-01-102 (рис. 3), после чего производили преднагружение образца (порядка 0,5 кН) и производили выращивание начальной трещины от надреза согласно [1].



1 – образец с трещиной в осевом направлении (тип 1);
2 – образец с трещиной в окружном направлении (тип 2)
Рисунок 1. Схема отбора образцов для проведения испытаний

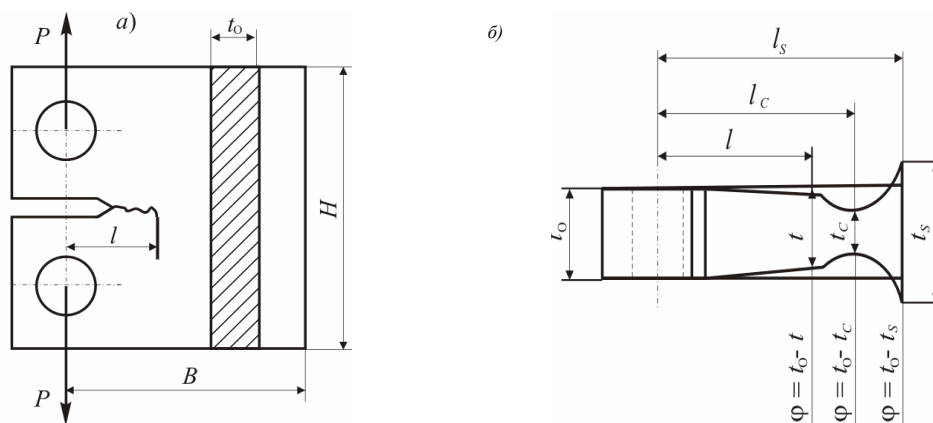
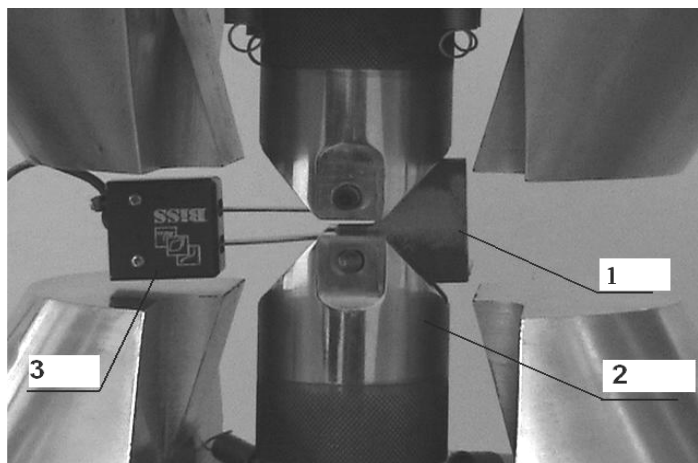


Рисунок 2. Схема испытания компактного образца (а) и измерения утяжки (б)

Испытание осуществляли при атмосферном давлении воздуха с относительной влажностью 40—60% и не содержащем активных по отношению к испытываемому материалу примесей, при циклическом нагружении, с коэффициентом асимметрии $R = 0,1$, частотой нагружения $f = 20$ Гц, синусоидальной форме цикла и при температуре 17—23°C.

Результаты испытаний образцов типа 1 и типа 2 с ориентацией трещины в осевом и окружном направлениях трубы представлены на рис. 4 – 7.

В табл. 1 приведены значения характеристик циклической трещиностойкости трубной стали, определенные по результатам проведенных испытаний и на основании разработанной методики.



1 – компактный образец; 2 – захват; 3 – датчик раскрытия вершины трещины
Рисунок 3. Фото нагруженного образца на испытательной машине Vi-01-102 .

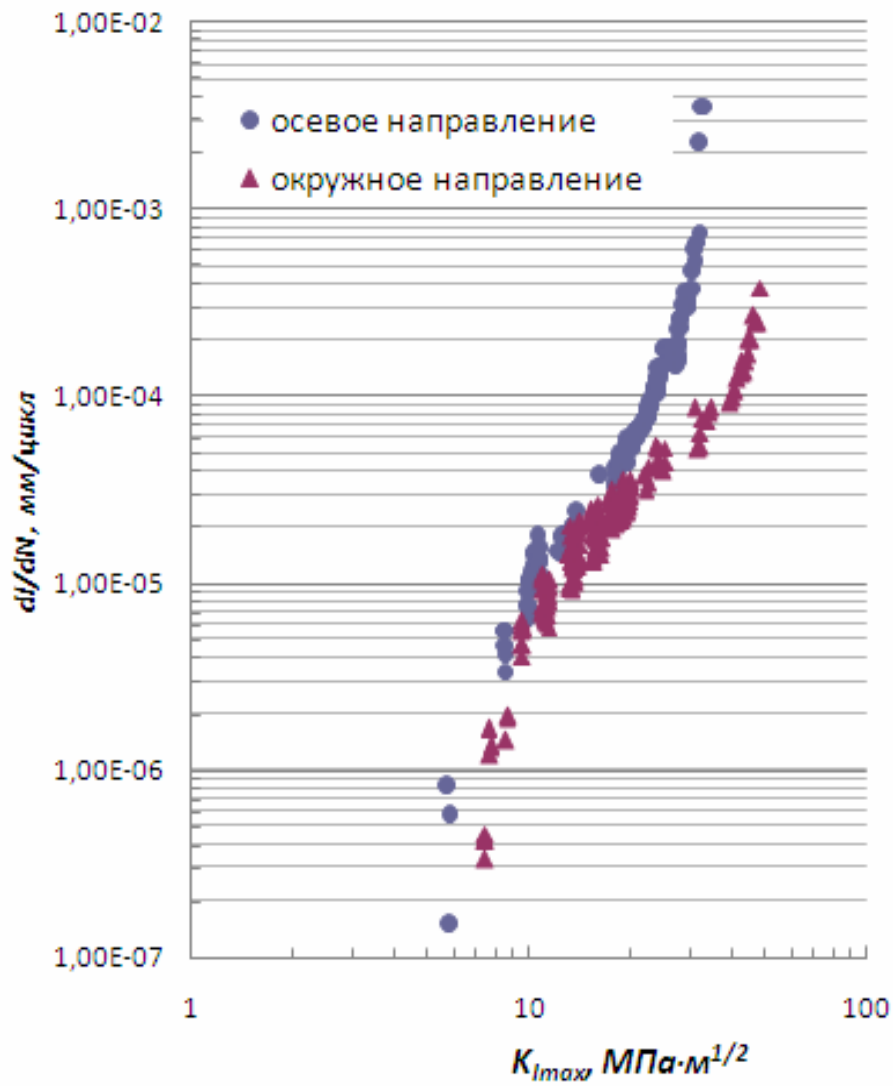


Рисунок 4. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения компактных образцов типа 1 и типа 2 (с ориентацией трещины в осевом и окружном направлениях трубы)

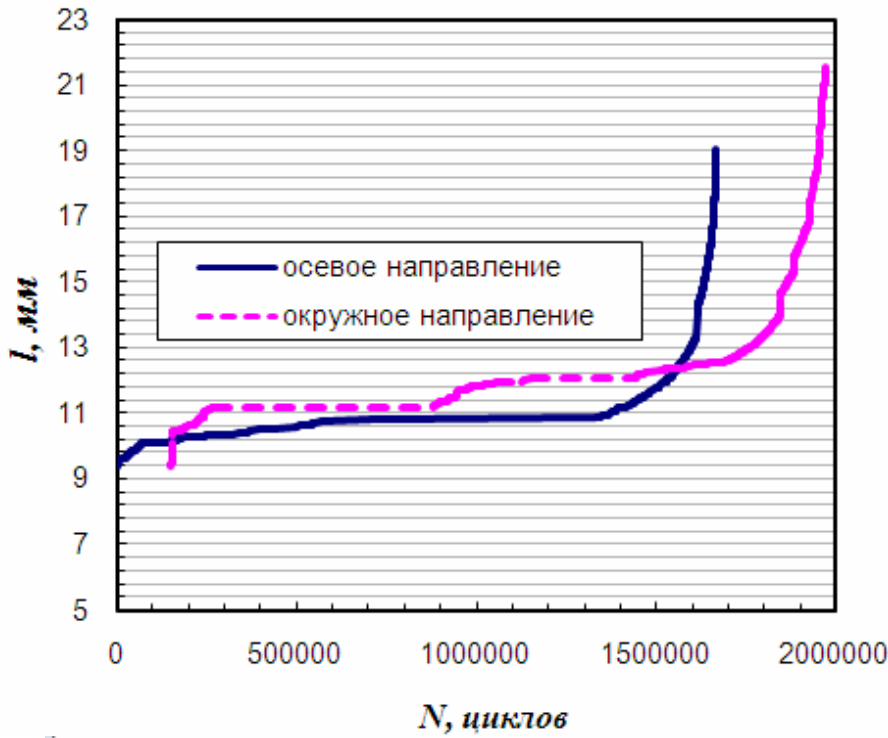


Рисунок 5.
Экспериментальные зависимости длины усталостной трещины I компактного образца типа 1 и 2 от числа циклов N нагружения

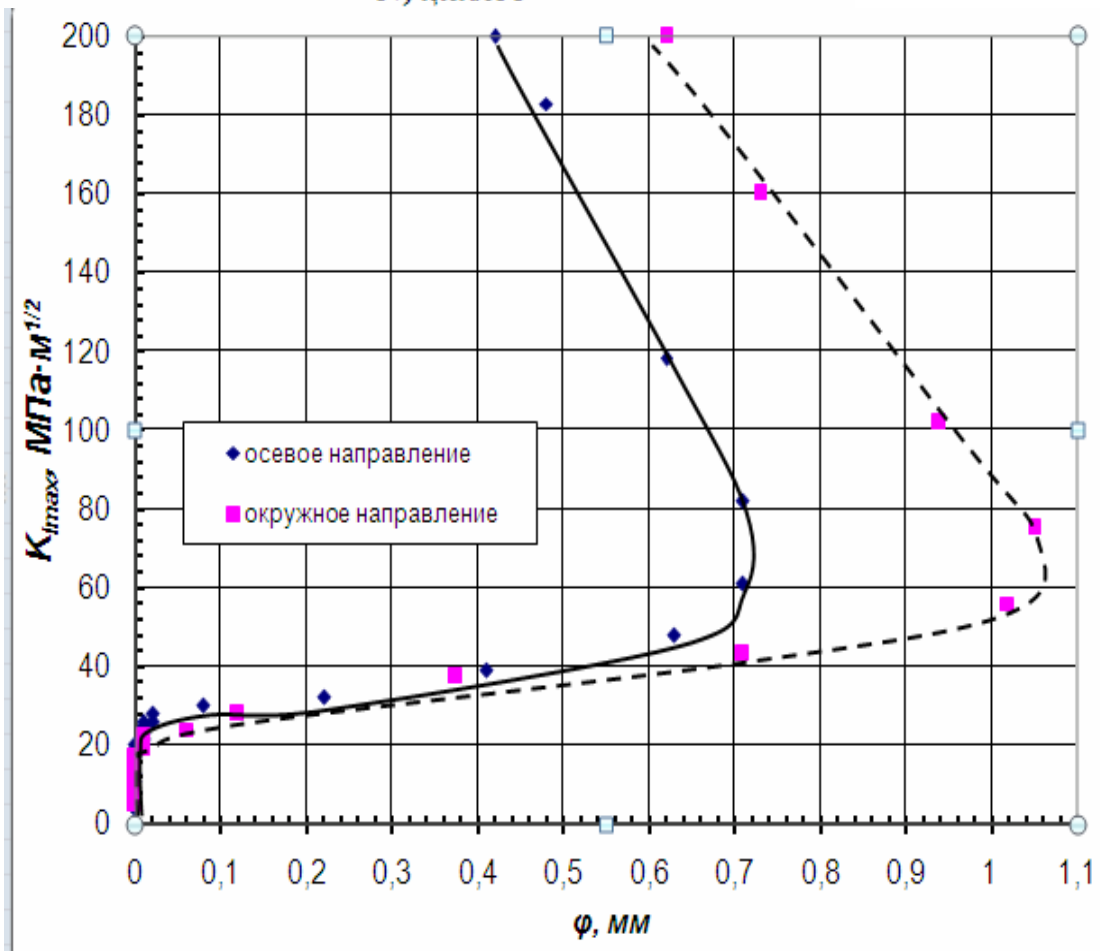


Рисунок 6. Типичные экспериментальные диаграммы циклического упругопластического разрушения компактных образцов типа 1 и типа 2

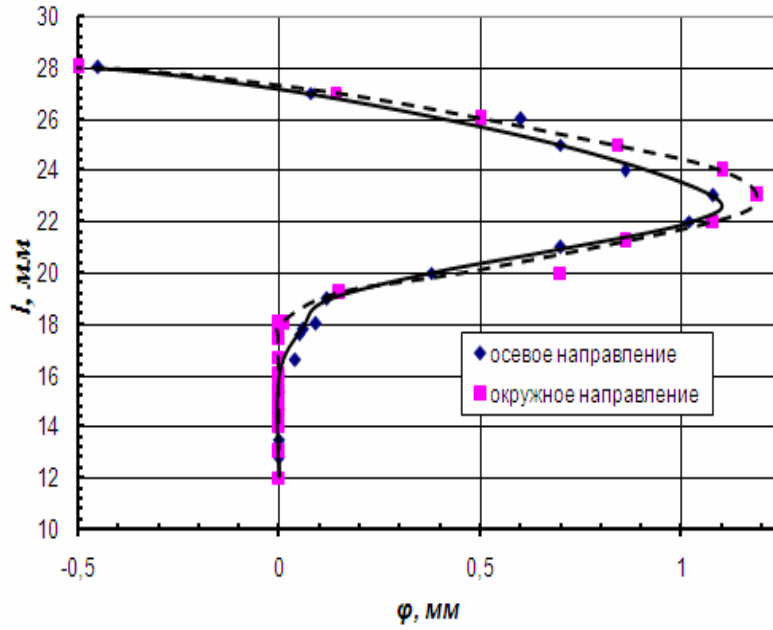


Рисунок 7. Типичные зависимости длины трещины l – утяжка φ компактных образцов типа 1 и типа 2, построенные по результатам испытаний на циклическую трещиностойкость

Таблица 1. Экспериментальные значения характеристик циклической трещиностойкости трубной стали после эксплуатации

Характеристика трещиностойкости	Окружное направление	Осевое направление
$K_{th}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\frac{6,5 \dots 8,0}{7,25}$	$\frac{5,5 \dots 6,5}{6,0}$
$K_Q, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\frac{48,0 \dots 54,4}{51,2}$	$\frac{25,1 \dots 33,0}{29,05}$
$K_{fc}^F, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\frac{72,0 \dots 87,2}{79,6}$	$\frac{51,0 \dots 70,2}{60,6}$
$\left(\frac{dl}{dn}\right)_{fc}, \text{м/цикл}$	$\frac{(0,38 \dots 1,37) \cdot 10^{-6}}{8,75 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{(0,44 \dots 3,61) \cdot 10^{-6}}{2,03 \cdot 10^{-6}}$
$l_{fc}, \text{мм}$	23	$\frac{22,0 \dots 23,0}{22,5}$
$\varphi_c, \text{мм}$	$\frac{1,06 \dots 1,18}{1,12}$	$\frac{0,55 \dots 0,75}{0,65}$
$\varphi_s, \text{мм}$	$\frac{-0,50 \dots -0,45}{-0,475}$	$\frac{-0,46 \dots -0,35}{-0,405}$

Как можно видеть из представленных результатов испытаний, циклическая вязкость разрушения K_{fc} исследуемой стали не может быть определена по стандартному методу [2] в виду того, что не выполняется условие плоской деформации (где t – толщина образца; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала):

$$t \geq 2,5 \left(\frac{K_{lmax}}{\sigma_{0,2}} \right)^2. \quad (1)$$

Поэтому в табл. 1 представлена условная величина циклической вязкости разрушения данной стали K_Q . В соответствии с разработанной ранее методикой [3-5] вычисление КИН с учетом поправки на пластичность материала позволяет определять предельное значение КИН K_{fc}^F с помощью построенной диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной, которое также приведено в табл. 1. При этом, если трещина ориентирована в образце в окружном направлении, то в среднем по результатам испытания партии образцов предельное значение КИН $K_{fc}^F = 79,6 \text{ МПа} \sqrt{м}$ оказывается выше условной циклической вязкости разрушения $K_Q = 51,2 \text{ МПа} \sqrt{м}$ на 35,7%. Аналогично для образцов, в которых трещина ориентирована в осевом направлении трубы, имеем: $K_{fc}^F = 60,6 \text{ МПа} \sqrt{м}$, $K_Q = 29,05 \text{ МПа} \sqrt{м}$. Разница составляет 52,1%. Если сравнивать предельные значения КИН и условные значения циклической вязкости разрушения для образцов типа 1 и 2, то и K_{fc}^F и K_Q оказались выше для образцов типа 2, т.е. сопротивление росту трещины на стадии предразрушения в исследуемой стали значительно больше в окружном направлении, чем в осевом. Об этом свидетельствует и критическая скорость $\left(\frac{dl}{dn} \right)_{fc}$ роста трещины в момент циклического долома образца: для образцов типа 1 она выше, чем для образцов типа 2 на ~ 57% (см. табл. 1). Хотя при этом критическая длина трещины l_{fc} у обоих типов образцов практически одинакова (22,5 и 23,0 мм соответственно).

Важной характеристикой трещиностойкости материала является пороговое значение КИН K_{th} , которое указывает на опасность страгивания трещин. Результаты испытаний показали, что величина K_{th} лишь незначительно (на ~ 17%) отличается у образцов типа 1 и 2: в среднем 6 и 7,25 МПа $\sqrt{м}$ соответственно (см. табл. 1).

Деформационные характеристики циклической трещиностойкости образцов трубной стали представлены в табл. 1 и на рис. 7: это предельная утяжка φ_c и предельное уширение φ_s . Установлено по результатам испытаний, что обе характеристики имеют большее значение для образцов типа 2, чем для образцов типа 1: в среднем предельная утяжка оказывается больше на ~ 42%, а предельное уширение – на ~ 14,7%. Этот факт, указывающий на более высокие пластические свойства трубы после длительной эксплуатации в окружном направлении, подтверждает известную закономерность увеличения сопротивления развитию трещин с ростом пластичности ряда сталей и снижения трещиностойкости при их охрупчивании [3-5].

Таким образом, установлено, что для исследованной трубной стали после длительной эксплуатации:

1. Значение условной величины циклической вязкости разрушения данной стали при ориентации трещины в окружном направлении (образцы типа 2) составляет $K_Q = 51,2 \text{ МПа} \sqrt{м}$, а в осевом направлении (образцы типа 1) $K_Q = 29,1 \text{ МПа} \sqrt{м}$, что на 52,1% ниже (см. табл. 1). Предельное значение КИН при ориентации трещины в окружном направлении больше на 35,7%, чем в осевом направлении.

2. Величина порогового КИН K_{th} на $\sim 17\%$ меньше у образцов типа 1, чем у образцов типа 2.

3. Деформационные характеристики циклической трещиностойкости исследованных образцов трубной стали – предельная утяжка φ_c и предельное уширение φ_s – больше для образцов типа 2, чем для образцов типа 1: в среднем предельная утяжка оказывается больше на $\sim 42\%$, а предельное уширение – на $\sim 14,7\%$. Это подтверждает известную закономерность увеличения сопротивления развитию трещин с ростом пластичности данной стали после длительной эксплуатации в окружном направлении.

Литература

1. Сосновский, Л.А. Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали [Текст] / Л.А. Сосновский, В.В. Воробьев // Проблемы прочности. – 2000. - № 6. – С. 44 – 53.
2. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. РД 50-345-82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 43 с.
3. Сосновский, Л.А. Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщение 1 [Текст] / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович // Проблемы прочности. – 1995. -№ 5-6. – С. 39 – 51
4. Сосновский, Л.А. Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщение 2 [Текст] / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович // Проблемы прочности. – 1995. -№ 5-6. – С. 52 – 61.
5. Сосновский, Л.А. Живучесть линейной части нефтепровода [Текст] / А.В. Богданович, А.М. Бордовский – Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2004. – 112 с.